



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 **Offenlegungsschrift**  
10 **DE 196 33 496 A 1**

61 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
**H 01 J 37/26**

21 Aktenzeichen: 196 33 496.9  
22 Anmeldetag: 20. 8. 96  
43 Offenlegungstag: 28. 2. 98

DE 196 33 496 A 1

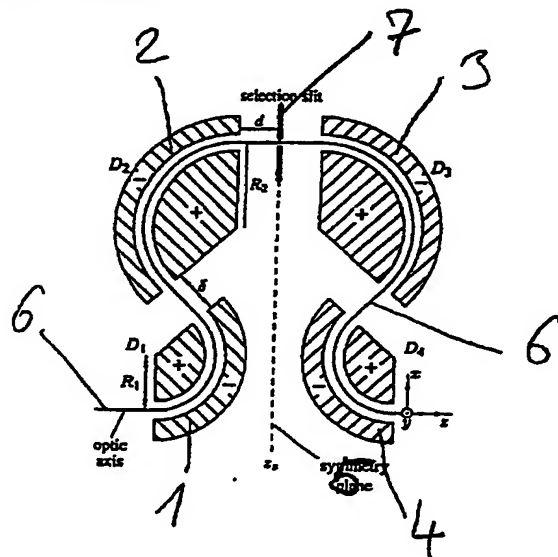
71 Anmelder:  
CEOS Corrected Electron Optional Systems GmbH,  
69120 Heidelberg, DE

74 Vertreter:  
Pöhner, W., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 97070  
Würzburg

72 Erfinder:  
Rose, Harald, Prof. Dr., 64289 Darmstadt, DE; Kahl,  
Frank, 56370 Allendorf, DE

54 Monochromator für die Elektronenoptik, insbesondere Elektronenmikroskopie

57 Bei einem Monochromator für die Elektronenoptik, insbesondere Elektronenmikroskopie zur stigmatischen Abbildung unter Verwendung von Ablenkfeldern und einer Schlitzeblende, wird vorgeschlagen, die Ablenkfelder (1-4) und den optischen Strahlengang spiegelsymmetrisch zu einer Ebene (5), der dispersiven Ebene, anzuordnen, in der dispersiven Ebene (5) ein astigmatisches Zwischenbild (= Linienfokus) zu erzeugen und die Schlitzeblende (7) dem astigmatischen Zwischenbild derart zuzuordnen, daß der Schlitz in Richtung des Linienfokus ausgerichtet ist.



DE 196 33 496 A 1

Die Erfindung bezieht sich auf einen Monochromator für die Elektronenoptik, insbesondere Elektronenmikroskopie, zur stigmatischen Abbildung unter Verwendung von Ablenkfeldern und einer Schlitzblende sowie deren Verwendung.

In der Elektronenmikroskopie, aber auch in der Holographie wird die zu übertragende Information durch die inkohärenten Bildfehler begrenzt, zu denen neben den durch mechanische Instabilitäten hervorgerufenen "Verwackelungen" vor allem die chromatischen Fehler zu rechnen sind. Kohärente Bildfehler lassen sich hingegen durch geeignete Maßnahmen und so durch rechnerische Methoden der Bildkonstruktion beseitigen. Bei statischen und raumladungsfreien Rundlinsen kann der Einfluß des chromatischen Fehlers nur durch Verringerung der Energiebreite des auftreffenden Elektronenstrahles verringert werden. Um in der Elektronenmikroskopie bei einer Beschleunigungsspannung von 200 kV die Informationsgrenze unter 1 Angström zudrücken, darf die Energiebreite 0,2 eV nicht überschreiten. Als Elektronenquellen mit den geringsten Halbwertsbreiten gelten bekanntlich die Feldemissionskathoden, bei denen die Energiehalbwertsbreite jedoch immer noch 0,7 bis 0,8 eV unter derartigen Bedingungen beträgt. Genauere Untersuchungen haben gezeigt, daß etwa 30% der Elektronen eine Abweichung von weniger als 0,1 eV besitzen und einen Strom von einigen wenigen Mikroampere erzeugen. Für bestimmte Anwendungen, wie die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) ist diese Stromstärke ausreichend, so daß das Herausfiltern der verbleibenden 70% der Elektronen ein gangbarer Weg zur Realisierung einer hinreichend monochromatischen Elektronenquelle mit ausreichender Stromstärke darstellen würde. Die grundsätzliche Realisierung dieses Zieles eröffnet die Verwendung eines Monochromators. Als erheblicher Nachteil ist anzusehen, daß die bekannten Monochromatoren ein stigmatisches Zwischenbild der Elektronenquelle erzeugen, was zu einer Energieverbreiterung aufgrund des Boersch-Effektes führt. Dieser Begriff bezeichnet das Phänomen, daß bei Elektronenstrahlen, die in einem Punkt fokussiert werden, aufgrund der dann in diesem Bereich herrschenden hohen Stromdichte und der hieraus resultierenden gegenseitigen Beeinflussung der Elektronen die Energiebreite des Strahles eine drastische Aufweitung erfährt.

Hiervon ausgehend hat sich die Erfindung die Schaffung eines elektronenoptischen Monochromators zur Aufgabe gemacht, mit dessen Hilfe die zur Verfügungstellung eines Elektronenstrahles geringe Energiebreite möglich wird.

Gelöst wird diese Aufgabe erfindungsgemäß dadurch, daß die Ablenkfelder und der optische Strahlengang spiegelsymmetrisch zu einer Ebene, der dispersiven Ebene, verlaufen, daß in der dispersiven Ebene ein astigmatisches Zwischenbild (=Linienfokus) erzeugt wird und die Schlitzblende dem astigmatischen Zwischenbild derart zugeordnet ist, daß der Schlitz in Richtung des Linienfokus ausgerichtet ist.

Die Ablenkfelder werden im Hinblick auf die räumliche Anordnung sowie ihre Stärke spiegelsymmetrisch zu einer Ebene angeordnet; gleichermaßen wird der Strahlengang so einjustiert, daß er ebenfalls symmetrisch zu der selben Ebene verläuft. Aufgrund der symmetrischen Verhältnisse werden die Bildfehlerintegrale für die Öffnungsfehler aber auch für die Verzeichnung in der Bildebene zu Null. In der durch die Spiegelsym-

metrie definierten Ebene, in der maximale Dispersion erfolgt, wird ein astigmatisches Zwischenbild (Linienfokus) erzeugt. Eine der wichtigsten Erkenntnisse vorliegender Erfindung ist, daß im Falle eines linienförmigen astigmatischen Bildes im Vergleich zu einem stigmatischen Zwischenbild eine wesentlich geringere Stromdichte erzeugt wird, so daß es nicht mehr zu einer wesentlichen Ausprägung des Boersch-Effektes kommt und hierin nicht mehr der limitierende Faktor der Abbildungsqualität zu sehen ist. Die Dispersion erfolgt senkrecht zum Linienfokus und wird vorteilhafterweise in der Symmetrieebene maximal eingestellt, so daß sie gleichzeitig die dispersive Ebene darstellt. Die Dispersion hat bekanntlich zur Folge, daß das Bild um so mehr vom Linienfokus abweicht je größer die Energieabweichung dieser Elektronen vom Mittelwert der den Ort des Linienfokus definierenden Elektronenenergie beträgt. Durch Zuordnung einer Schlitzblende zum astigmatischen Zwischenbild, in der Weise, daß der Schlitz in die Richtung des Linienfokus ausgerichtet ist, lassen sich bei geeigneter Einstellung der Schlitzweite all jene Elektronen ausfiltern, die in ihre kinetischen Energie hinreichend von den mittleren Elektronenenergie abweichen. Die Veränderung der Schlitzbreite hat eine Änderung der Energiebreite der durchgelassenen Elektronen zur Folge. Im Ergebnis erhält man im stigmatischen Bild nur noch jene Elektronen, die in ihrer Energiebreite unter einer durch die Einstellung der Schlitzblende vorgegebenem Wert liegen. Bei Abbildung einer Elektronenquelle läßt sich ein Elektronenstrom mit hinreichend geringer Energiebreite erzeugen.

Im Rahmen der Erfindung steht grundsätzlich frei, welche Art von Ablenkfeldern eingesetzt werden. Neben magnetischen Feldern, die permanent oder durch Ströme erzeugt sein können, ist die Verwendung elektrostatischer Felder als besonders bevorzugt zu erachten. Aufgrund der hohen Spannungen gegenüber der Erde sind elektrostatische Ablenkfelder einfacher realisierbar. Ihnen ist bei bestimmten Anwendungsfällen, wie der Transmissionselektronenmikroskopie, der Vorzug zu geben.

Im Hinblick auf die räumliche Anordnung ist der spiegelsymmetrische Aufbau zur Symmetrieebene entscheidend, die gleichzeitig die dispersive Ebene darstellt. So ist die Form einer in einer Ebene liegenden Schlaufe denkbar. Besonders bevorzugt ist jedoch, wenn der Aufbau und somit der optische Strahlengang der Form eines Omega entspricht. Gegenüber anderen denkbaren Lösungen zeichnet sie sich dadurch aus, daß sie eine Realisierung des Monochromators mit geringer Bauhöhe zuläßt.

Zur Erreichung einer präzisen Filterwirkung ist von Vorteil, wenn die Bildfehler zweiter Ordnung, insbesondere die Öffnungsfehler senkrecht zur Schlitzblende in der Dispersionsebene möglichst klein gewählt werden. Um den Durchmesser des Bildpunktes gering zu halten müssen die Bildfehler zweiter Ordnung in der Bildebene ebenfalls möglichst gering gehalten werden.

Die Ablenkfelder bestehen aus Dipolen, die zu einer Krümmung des optischen Strahlenganges Anlaß geben und denen Quadropole überlagert sind, um die in der einen Richtung senkrecht zum Strahlengang erfolgende Defokussierung zu kompensieren. Die Realisierung der Dipol- und Quadropolfelder kann durch entsprechende Gestaltung der Elektrodenoberfläche Umsetzung finden.

Die Erzeugung des astigmatischen Zwischenbildes wird im mathematischen Sinn dadurch beschrieben, daß

die beiden Elementarlösungen der zugrundeliegenden Differentialgleichung, die von der optischen Achse im Gegenstandspunkt in den beiden senkrecht zueinander verlaufenden Schnitten ausgehen in der Ebene der Blende zum einen einen Maximalwert annehmen und zum anderen zu Null werden. Dabei weist der eine Strahlengang eine Punktsymmetrie und der andere eine Spiegelsymmetrie zur dispersiven Ebene auf, in der weiterhin die Dispersion einen Maximalwert annimmt, die in der Gegenstands- und Bildebene zu Null wird, so daß ebenfalls ein zur dispersiven Ebene spiegelsymmetrischer Verlauf gegeben ist.

Einsatz und Verwendung des erfindungsgemäßen Monochromators sind vielfältig. Unter Anlehnung an die Ausführungen zum Stande der Technik kann er dazu eingesetzt werden, einen Elektronenstrom von vorgebar und in ihren Grenzen veränderbarer Energiebreite zu erzeugen. Zu diesem Zweck wird die Elektronenquelle von großer Energiebreite im Gegenstandspunkt des Monochromators angeordnet, so daß man im Bildpunkt die stigmatische Abbildung der Elektronenquelle jedoch mit demgegenüber geringerer Energiebreite erhält. Der Monochromator ist hierzu unmittelbar hinter der Elektronenquelle einzuordnen.

In einer anderen Möglichkeit der Verwendung wird der Monochromator in den Abbildungsstrahlengang des abbildenden elektronenoptischen Systems eingebracht. Seine Aufgabe besteht darin, durch entsprechende Einstellung der Schlitzelektronen bestimmter Energien aus dem Strahlengang zu selektieren. Durch Veränderung des Energiefensters lassen sich die Energien dieser Elektronen sowie die Energiebreite des erfaßten Strahlenganges bestimmen und variieren. Bei Elektronen niederer Energie kann der aus der Transmissionselektronenmikroskopie bekannte Monochromator direkt übernommen werden.

Bei einem speziellen Einsatz in der Niederenergieelektronenmikroskopie wird der Monochromator bei der Abbildung der vom Objekt emittierten oder rückgestreuten Elektronen eingesetzt. Diese Elektronen haben von Haus aus eine hohe Energiebreite. Eine Verbesserung des Kontrastes läßt sich durch Nutzung von Elektronen aus einem schmalen Energieband erreichen. Durch selektives Setzen des Energiefensters können sukzessive bestimmte Signale herausgegriffen und verstärkt und andere demgegenüber abgeschwächt werden. Eine gezielte Hervorhebung bestimmter Informationen ist auf diesem Wege möglich.

Weitere Einzelheiten, Merkmale und Vorteile der Erfindung lassen sich dem nachfolgenden Beschreibungsteil entnehmen, in dem anhand der Zeichnung ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wiedergegeben wird. Sie zeigt in Querschnittsdarstellung einen Schnitt in Richtung der optischen Achse durch einen Monochromator.

Die elektrostatischen Ablenkfelder (1-4) sind paarweise symmetrisch zur Mittelebene (5) angeordnet. Die optische Achse des gekrümmten Strahlenganges ist ebenso wie die Gesamtheit der Ablenkfelder (1-4) von der vorn eines Omega.

Dort, wo der Strahlengang (6) die Symmetrieebene (5) schneidet, ist eine Schlitzelektrode (7) angeordnet, die senkrecht zur Zeichenebene verläuft und in der der Linienfokus des astigmatischen Zwischenbildes liegt. Senkrecht hierzu, d. h. in der Zeichenebene, erfolgt die Dispersion, also eine Ablenkung vom mittleren Strahlengang um einen Wert, der proportional ist der Energieabweichung. Durch Veränderung der Schlitzweite läßt sich selektiv die Energiebreite der von der Schlitz-

ebene durchgelassenen Elektronen feststellen und verändern. Im Ergebnis erreichen nur jene Elektronen den Bildpunkt, die sich innerhalb dieser Energiebreite befinden. Der Elektronenstrahl wird als Resultat monochromatisch.

#### Patentansprüche

1. Monochromator für die Elektronenoptik, insbesondere Elektronenmikroskopie zur stigmatischen Abbildung unter Verwendung von Ablenkfeldern und einer Schlitzelektrode, dadurch gekennzeichnet, daß die Ablenkfelder (1-4) und der optische Strahlengang spiegelsymmetrisch zu einer Ebene (5), der dispersiven Ebene, verlaufen, daß in der dispersiven Ebene (5) ein astigmatisches Zwischenbild (= Linienfokus) erzeugt wird und die Schlitzelektrode (7) dem astigmatischen Zwischenbild derart zugeordnet ist, daß der Schlitz in Richtung des Linienfokus ausgerichtet ist.
2. Monochromator nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch elektrostatische Ablenkfelder (1-4).
3. Monochromator nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch einen Aufbau in Omega-Form.
4. Monochromator nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildfehler zweiter Ordnung, insbesondere die Öffnungsfehler, senkrecht zur Schlitzelektrode in der Dispersionssebene und/oder in der Bildebene minimiert sind.
5. Monochromator nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Ablenkfelder (1-4) aus Dipolen und überlagernden Quadropolen bestehen.
6. Verwendung des Monochromators nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Monochromator hinter einer Elektronenquelle angeordnet ist, die im Objektpunkt des Monochromators liegt und in den Bildpunkt abgebildet wird.
7. Verwendung eines Monochromators gemäß der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß er in den Abbildungsstrahlengang eines elektronenoptischen Systems eingebracht wird.
8. Verwendung des Monochromators nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß er zur Abbildung niederenergetischer Elektronen, z. B. Sekundärelektronen, eingesetzt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

